

Hochtemperaturkeramik für Automobilgasturbinen

Wenn es in Zukunft gelingt, Turbinenbauteile aus Hochtemperaturkeramik einzusetzen, können die Arbeitstemperaturen in Fahrzeuggasturbinen um 300 K gesteigert werden. Damit könnte ein großer Teil der heute noch vorhandenen Probleme dieser Antriebe gelöst werden. Im ersten Teil des Berichtes in MTZ 37 (1976) 11 wurde eine Keramikgasturbine mit 1623 K Turbineneintrittstemperatur für den Antrieb eines Personenwagens der gehobenen Mittelklasse konzipiert. Die Zukunftsaussichten wurden in einer Gegenüberstellung mit konventionellen Antrieben in den wichtigsten Beurteilungskriterien wie Kraftstoffverbrauch, Schadstoffemission und Herstellkosten ermittelt. Im vorliegenden zweiten Teil werden die keramischen Werkstoffe, die Auslegung der keramischen Bauteile und der heute erreichte Stand der Entwicklung dieser Bauteile im Volkswagenwerk dargestellt.

High Temperature Ceramics for Automotive Gas Turbines, Part 2

Abstract

In case turbine parts from high temperature ceramics can be developed, it will be possible to raise the working temperatures in automotive gas turbines by as much as 300 K. As a result, it should be possible to solve a major part of the still existing problems of these engines. In a previous article in MTZ 37 (1976) 11 the design of a ceramic gas turbine with a 1623 K turbine inlet temperature as power plant for an automobile of the upper middle class was described. The potential of this engine was evaluated by comparing it with conventional automotive power plants on the basis of fuel economy, emissions and production costs. In this report the ceramic materials, the layout of the ceramic parts, as well as the present state of development of these parts in the „Volkswagenwerk“ are described.

Teil 2:

Entwicklung keramischer Bauteile

4. Beanspruchungsarten der Bauteile

Im 1. Teil des Berichtes wurde ein Konzept für eine Gasturbine mit 1623 K Turbineneintrittstemperatur beschrieben. Es wurde gezeigt, daß mit einem solchen Aggregat verschiedene Vorteile gegenüber konventionellen Motoren erreicht werden können. Wegen der hohen Arbeitstemperaturen der Gasturbine müssen bei allen Heißgas führenden Bauteilen neuartige Keramikwerkstoffe eingesetzt werden. Diese Bauteile sind das Flammrohr der Brennkammer, die Leitkränze und Laufräder beider Turbinenstufen, der Wärmetauscher so-

wie die Heißgaskanäle. Tafel 5 zeigt typische Beanspruchungen, denen diese Bauteile unterworfen sind.

Die mechanischen und thermischen Spannungen eines Bauteils hängen von der Auslegung ab und davon, wie das Triebwerk eingesetzt werden soll. Im vorliegenden Fall wurde angenommen, daß das Gasturbinenfahrzeug 3600 Stunden im Gemischtzyklus nach Tafel 2 (siehe Teil 1) betrieben wird. Dieser Zyklus umfaßt alle stationären Fahrzustände sowie mehrere 100 000 Lastwechsel bei hohen Temperaturen. Bild 10 zeigt die Klassierung der dabei gefahrenen Gaserzeugerdrehzahlen und gibt die im Triebwerk herrschenden Temperaturen an. Hinzu kommen etwa 15 000 Kaltstart- und Heißabschaltvorgänge.

Die stationäre Betriebsphase mit der höchsten Beanspruchung ist der Vollastbetrieb. Dieser wird innerhalb der gesamten Betriebszeit etwa 300 Stunden gefahren. Die statischen Bauteile sind dabei vor allem durch thermische Spannungen belastet, die aus ungleichmäßigen Temperaturverteilungen in Umfangsrichtung, aus Temperaturgradienten in Strömungsrichtung oder an Einspannstellen entstehen können. Zum Teil können diese Spannungen durch konstruktive Maßnahmen niedrig gehalten werden.

Die rotierenden Bauteile werden durch thermische Spannungen und Spannungen aus Fliehkräften belastet. Die bei diesen Bauteilen auftretenden Gesamtspannungen begrenzen zusammen mit der Temperaturbeständigkeit der Werkstoffe die Betriebsbedingungen des Triebwerkes.

Bei der Auswahl der Werkstoffe ist auch darauf zu achten, daß Längenänderungen, die im Laufe der Betriebszeit durch Kriechen entstehen können, unter 1% bleiben. Im Wärmetauscher wird die Temperatur der Heißgase um 700 K abgesenkt bzw. die der Luft erhöht. Dadurch entsteht dort ein besonders großer Temperaturgradient, der nicht nur bei Vollast vorhanden ist, sondern auch bei Teillast bestehen bleibt. Es muß also ein Werkstoff gewählt werden, der diese großen Temperaturgradienten über die ganze Betriebszeit ertragen kann.

In den instationären Betriebsphasen ändert sich die Gastemperatur plötzlich. Dies führt bei Bauteilen, die unmittelbar

Tafel 5. Typische Beanspruchungen von keramischen Turbinenbauteilen

Beanspruchung	Stationärer Betrieb	Stationärer Betrieb	Stationärer Betrieb	Stationärer Betrieb	Stationärer Betrieb
Bauteil	max. Bauteiltemperatur K	max. Zugspannung N/mm ²	max. Zugspannung N/mm ²	max. Zugspannung N/mm ²	max. Zugspannung N/mm ²
Flammrohr	1820	Spannungsspitzen an Zumiischbüchern			
Zuströmkanal	1620	70	120 bei Kaltstart		
1. Leitschaufelkranz	1620	110 aus Fliehkraft und Kerbwirkung	200 bei Thermochock		
1. Laufschaufelkranz	1570		450 bei Kaltstart		
1. Laufradnabe	außen 1400 innen 700	380 an Bohrung			
Zwischendiffuser	1420				
2. Leitschaufeln	1420	50			
2. Laufschaufeln	1370	150 aus Fliehkraft und Kerbwirkung im Fußprofil			
Wärmetauscher	Heiße Seite 1270 Kalte Seite 600				

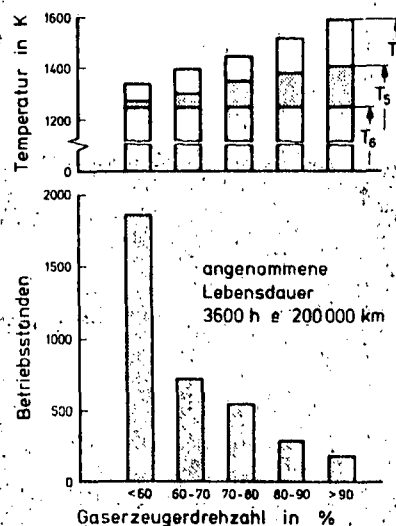


Bild 10. Klassierung der Betriebszustände in einem für Europa typischen Personenwagen-Lastzyklus
 T_4 Gastemperatur an Gaserzeugerturbineneintritt
 T_5 Gastemperatur an Nutzturbineneintritt
 T_6 Gastemperatur an Wärmetauschereintritt

vom Heißgas beaufschlagt werden, zu einer Thermoschockbeanspruchung. Diese Thermoschockbeanspruchung hängt von der Bauteilform und den physikalischen Daten des Werkstoffes ab. So sind vor allem die Schaufelkränze mit den dünnen Schaufelprofilen und Übergängen in massive Ringe oder Scheiben besonders gefährdet. Vergleichswerte für die Widerstandsfähigkeit der Werkstoffe gegen Thermoschock bzw. die Temperaturwechselbeständigkeit können aus der Festigkeit, dem E-Modul, dem Ausdehnungskoeffizienten und der Wärmeleitfähigkeit abgeleitet werden. Bei einem Start des Triebwerkes aus dem kalten Zustand treten in den Bauteilen die größten Temperaturgradienten auf. Ein solcher Kaltstart mit anschließender Beschleunigung auf Vollast führt zum Beispiel bei den Laufradnaben zu den größten im Betrieb auftretenden Spannungen.

Eine Gasturbine arbeitet mit hohem Luftüberschuß, so daß in den Verbrennungsgasen noch ein großer Sauerstoffanteil enthalten ist. Bei der Auswahl der Werkstoffe muß darauf geachtet werden, daß die festigkeitsmäßigen Eigenschaften der Bauteile auch unter der stark oxidierenden Wirkung der Heißgase erhalten bleiben. Zusätzliche Angriffe können durch korrosive Bestandteile in den Verbrennungsgasen entstehen. Eine Erosion der keramischen Bauteile durch Partikelchen im Heißgasstrom wird wegen der großen Härte der Keramiken kaum auftreten. Hinzu kommt noch, daß für Fahrzeuggasturbinen Ansaugfilter vorgesehen sind und sich in den auf Schadstoffreinheit optimierten Brennkammern kaum Ablagerungen bilden. Dies verringert auch die Gefahr einer Stoßbelastung der spröden keramischen Werkstoffe.

Schließlich stellt auch die Geometrie der Bauteile ein Aus-

wahlkriterium für die Werkstoffe dar. So sind aus aerodynamischen Gründen bei den Schaufelkränzen komplizierte Profile mit Hinterkantenradien <0,5 mm notwendig. Einige Bauteile müssen in großvolumigen und dünnwandigen Formenspannungsfrei dargestellt werden können. Um später eine wirtschaftliche Fertigung zu erreichen, sollte sich jedes der Bauteile in einem Arbeitsgang ohne größere Nacharbeit herstellen lassen. Beim Wärmetauscher ist eine größtmögliche wärmetauschende Oberfläche in einem kleinen Volumen mit großen Durchgangsquerschnitten gefordert. Die Werkstoffe müssen deshalb zu einer Matrix mit Wanddicken von etwa 0,1 mm verarbeitet werden können. Sie dürfen außerdem keine Querverporosität aufweisen.

5. Auswahl geeigneter Hochtemperaturkeramiken

Aus der Vielzahl möglicher Keramiken erfüllen Siliziumnitrid Si_3N_4 , Siliziumkarbid SiC und verschiedene Arten von Glaskeramik die Anforderungen in einer Gasturbine am ehesten. In Bild 11 ist die mittlere Biegebruchfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. In Tafel 6 sind weitere physikalischen Eigenschaften dieser Werkstoffe angegeben. Diese Werte stammen aus Angaben der Keramikindustrie [19...28] sowie aus eigenen Untersuchungen und sind für diese Werkstoffe typisch. Abweichungen aufgrund verschiedener Herstellverfahren und Zusammensetzung sind möglich. Zum Vergleich sind Werte einer metallischen Superlegierung angegeben. Neben diesen Werkstoffen könnten in Zukunft auch noch Sialone interessant werden [29]. Sie wurden hier nicht mit aufgeführt, da ihre Entwicklung noch nicht soweit fortgeschritten ist wie die der übrigen Werkstoffe.

Wenn Siliziumnitrid im Heißpreßverfahren verarbeitet wird, erreicht es nahezu 100% der theoretischen Dichte und die höchste Festigkeit. In diesem Verfahren kann Si_3N_4 -Pulver unter hohem Druck und hoher Temperatur zu Bauteilen mit einfachen Formen verarbeitet werden. Zur Verbesserung des Preßvorganges werden dabei dem Si_3N_4 -Pulver Flußmittel wie MgO beigemischt. Eine Nacharbeit ist nur mit Diamantwerkzeugen oder durch Ultraschallerosion möglich. Bei Temperaturen über 1250 K erweichen die bisher verwendeten Flußhilfsmittel und ein belastetes Bauteil kriecht. Der Werkstoff scheint deshalb in erster Linie für die Anforderungen in der Nabe der Turbinenläufer geeignet, wo hohe Festigkeit bei einfacher Form gefordert ist und etwas niedrigere Temperaturen auftreten.

Beim Reaktionssintern von Siliziumnitrid werden die Bauteile zunächst aus dem Si-Pulver im Verfahren wie Spritzgießen, Schlickergießen und isostatisches Pressen geformt. In einem anschließenden Sintervorgang in Stickstoffatmosphäre reagiert das Silizium zu Siliziumnitrid. Erreicht wird 70...80% der theoretischen Dichte. Die Festigkeiten liegen niedriger als beim Heißpressen. Jedoch können mit diesem Verfahren auch komplizierte Bauteilformen hergestellt werden. Außerdem ist in einem Zwischenstadium des Nitriervorganges ein Nacharbeiten mit konventionellen Mitteln möglich. Da der Werkstoff keine Sinterhilfsmittel enthält, wird Kriechen kaum auftreten. Reaktionsgesintertes Siliziumnitrid kommt deshalb in erster Linie für die Leit- und Laufschaufelkränze der Turbinen in Frage. Untersucht werden muß

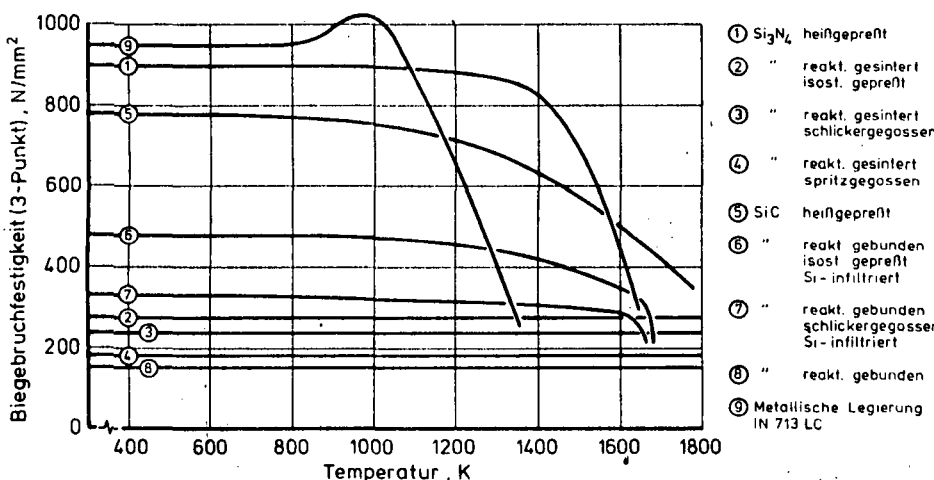


Bild 11. Mittlere Biegebruchfestigkeit von keramischen Werkstoffen in Abhängigkeit von der Temperatur

Tafel 6. Typische Werte von physikalischen Eigenschaften keramischer Werkstoffe

Eigenschaft Werkstoff	Schmelztemperatur	Dichte	E-Modul	Ausdehnungskoeffizient	Wärmeleitfähigkeit	Thermoschockparameter (bei 1260 K) ($\sigma_2 = 0,7 \cdot \sigma_B$, angenommen)	
	K	$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$\times 10^9 \text{ N/m}^2$	$\times 10^{-6} \text{ m/mK}$	W/mK	$R_1 = \frac{\sigma_2}{E \cdot \alpha}$	$R_2 = \frac{\lambda \cdot \sigma_2}{E \cdot \alpha}$
Si_3N_4 , heißgepreßt	2170	3,2	290	3,1	18	610	11 000
Si_3N_4 , reaktionsgesintert, isostat. gepreßt	2170	2,6	180	3,0	9	360	3 240
SiC , heißgepreßt	2520	3,2	410	4,3	40	280	11 200
SiC , reaktionsgebunden Si infiltriert	1650 schmelzen d. freien Si	3,1	380	4,4	50	210	10 500
SiC , reaktionsgebunden	2520	2,7	200	4,8	22	85	1 870
Glaskeramik, LAS	1575	2,2	12	0,6	1	830	830
INCO 713 C (bei 1000 K)	1580	7,9	170	15	25	350	8 750

noch, inwieweit Oxidation und Korrosion insbesondere auch in Verbindung mit häufigen Temperaturwechseln ein Problem darstellen.

Beim Siliziumkarbid sind besonders diejenigen Fertigungsverfahren interessant, bei denen Bauteile aus SiC-Pulver geformt, gesintert und während des Sinterprozesses durch Infiltrieren mit freiem Silizium verdichtet werden. Hierbei können relativ hohe Festigkeiten und insbesondere mit Schlickergießen auch komplizierte Bauteilformen hergestellt werden. Wegen der hohen Wärmeleitfähigkeit des Materials wird die Temperatur in den Bauteilen sehr schnell ausgeglichen. Diese Werkstoffe scheinen deshalb besonders für das Flammrohr und für die Strömungskanäle geeignet. Beim Flammrohr muß im Bereich der Reaktionszone allerdings eine Einschränkung gemacht werden. Dort können im Betrieb Wandtemperaturen oberhalb 1700 K auftreten. Bei diesen Temperaturen schmilzt das freie Silizium, so daß in diesem Bereich des Flammrohres eventuell doch auf Werkstoffe zurückgegriffen werden muß, die nicht mit Silizium infiltriert sind.

Glaskeramiken zeichnen sich durch besonders niedrige Ausdehnungskoeffizienten aus, so daß in einem Bauteil auch bei einem großen Temperaturgradienten nur kleine thermische Spannungen entstehen. Für keramische Wärmetauscher wurden deshalb bisher diese Werkstoffe verwendet. Werkstoffe auf der Basis von Lithium-Aluminium-Silikat erweichen bereits bei Temperaturen zwischen 1200...1500 K. Wie gezeigt wurde, werden in einer keramischen Gasturbine im Regenerator jedoch höhere Temperaturen auftreten. Außerdem zeigte sich, daß der Lithiumanteil in diesen Werkstoffen von Natrium und Schwefel in den Verbrennungsgasen angegriffen wird. Deshalb wird jetzt an der Entwicklung von Wärmetauschern auf der Basis von Magnesium-Aluminium-Silikat und Aluminium-Silikat [10] oder auch auf der Basis von reaktionsgesintertem Siliziumnitrid [9] gearbeitet.

6. Berechnung keramischer Bauteile

Keramiken sind spröde Werkstoffe. Sie können im allgemeinen Spannungsspitzen nicht durch plastische Deformation abbauen. Die Spannungen aus mechanischen und thermischen Belastungen, insbesondere Spannungsspitzen aus Kerbwirkung, Punktlast oder großen lokalen Temperaturgradienten müssen deshalb bei der Bauteilauslegung sehr genau ermittelt werden. Dies erfordert eine Nachbildung der Bauteile in dreidimensionalen Finite-Elemente-Modellen und umfangreiche Rechenprogramme zur Bestimmung der dreidimensionalen Temperatur- und Spannungsverteilung. Da alle Keramiken eine wesentlich höhere Druck- als Zugfestigkeit besitzen, werden bei der Berechnung nur die Zugspannungen berücksichtigt. Schließlich scheint im Unterschied zu den metallischen Werkstoffen bei einem keramischen Bauteil weniger die Häufigkeit, mit der eine Belastung auftritt, eine Rolle zu spielen, als die im kritischen Betriebsfall in einem Bauteil maximal auftretende Zugspannung.

Bei den Werkstoffen lassen sich Unregelmäßigkeiten wie Einschlüsse oder Mikrorisse im Werkstoff oder an der Oberfläche nicht vermeiden. Unter Belastung entstehen an diesen Stellen Spannungskonzentrationen. Übersteigt an einer dieser Stellen bei der spröden Keramik die Spannung ihren kritischen Wert, wird das ganze Bauteil brechen. Dieses Verhalten der Keramik hat zur Folge, daß die Festigkeitswerte streuen. Weiterhin ist die Festigkeit der Werkstoffe vom Volumen bzw. der Oberfläche abhängig, da zum Beispiel in einem größeren Volumen auch die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von kritischen Unregelmäßigkeiten größer ist.

Die mittlere Bruchfestigkeit, wie sie in Bild 11 für verschiedene Keramiken angegeben ist, ist demnach zur Charakterisierung des Werkstoffes allein nicht ausreichend. Zur Berechnung eines Bauteils werden neben dieser Festigkeit noch Angaben über die Streuung der Festigkeitswerte, über die Spannungsverteilung bei der Belastung und über die Geometrie der Proben benötigt.

Aus der statistischen Verteilung der Festigkeitswerte folgt, daß

Aussagen über die Festigkeit eines keramischen Bauteils nur die Form von Voraussagen über die Bruchwahrscheinlichkeit haben können. Die Bruchwahrscheinlichkeit P wird nach der Theorie von W. Weibull [30] durch folgende Beziehung bestimmt:

$$P = 1 - e^{-\int \left(\frac{\sigma_a - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m dV}$$

Dabei sind:

- σ_a Spannung im betrachteten Volumenelement dV
- σ_u Spannung, bei der mit Sicherheit kein Bruch eintritt. Wird mit $\sigma_u = 0$ angenommen
- σ_0 Charakteristische Festigkeit des Bezugsvolumen
- m Weibullparameter, charakterisiert die Streuung
- dV Volumen des betrachteten Elements

Diese Beziehung berücksichtigt den Volumeneinfluß. Der Oberflächeneinfluß kann durch eine ähnliche Gleichung erfaßt werden. Neben dieser Bestimmung der Bruchwahrscheinlichkeit sind auch die Zeitstandsfestigkeit, die durch das langsame Rißwachstum bestimmt wird, das Kriechen oder auch die Schwingungsfestigkeit zu untersuchen.

7. Stand der Entwicklung keramischer Bauteile

7.1. Entwicklungsziele

In den USA wird in den eingangs erwähnten Programmen schon seit langem an der Entwicklung von keramischen Turbinenbauteilen gearbeitet. Inzwischen ist es dort gelungen, für alle statischen Bauteile inklusive Leitschaufelkränzen eine Lebensdauer von etwa 200 Stunden nachzuweisen [14]. Mit neuartigen glaskeramischen Wärmetauschern wurden bei Temperaturen von 1250 K Betriebszeiten von etwa 1000 Stunden erreicht [10]. Beim Laufrad ist es trotz großer Anstrengungen bisher noch nicht gelungen, ähnliche Erfolge zu erzielen. Ohne eine Lösung für ein keramisches Laufrad sind jedoch die angestrebten hohen Arbeitstemperaturen in der Gasturbine nicht verwirklichtbar. Die Entwicklungen, die auf dem Gebiet keramischer Bauteile für Gasturbinen bei der Volkswagenwerk AG betrieben werden, konzentrieren sich deshalb auf die Darstellung eines keramischen Turbinenlaufrades. Untersucht werden dabei vollkeramische Laufradkonzepte wie auch Konzepte, bei denen das Laufrad aus einer metallischen Nabe und keramischen Einzelschaufeln besteht. Daneben wird repräsentativ für die statischen Bauteile an der Entwicklung einer keramischen Brennkammer und eines Leitschaufelkranzes gearbeitet.

Bild 12 zeigt eine Auswahl der bisher beim Volkswagenwerk entwickelten keramischen Turbinenbauteile.

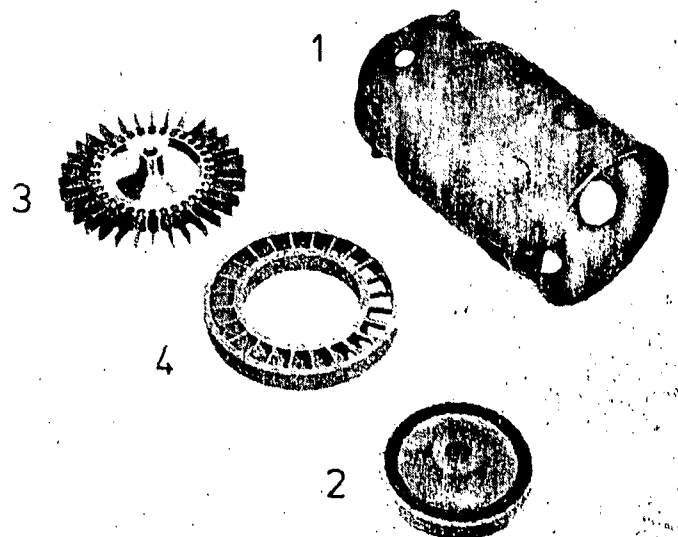
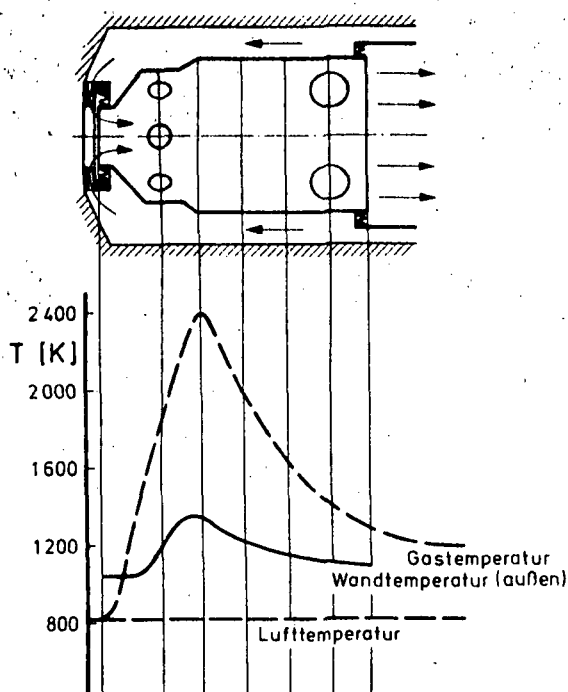


Bild 12. Keramische Turbinenbauteile
1 Flammrohr der Brennkammer
2 Vollkeramisches Laufrad aus heißgepresster Nabe und reaktionsgesintertem Kranz
3 Laufrad aus metallischer Nabe und keramischen Einzelschaufeln
4 Leitschaufelkranz



Stationärer Betriebszustand bei Prüfstandversuchen

Bild 13. Temperaturverteilung über der Länge eines keramischen Flammrohres (Versuchsbedingungen)

7.2. Brennkammer

In Bild 12 ist das Flammrohr einer Brennkammer aus infiltrierte Siliziumkarbid dargestellt. Die Fertigung erfolgte im Schlickerguß. Bei der experimentellen Erprobung wurden bisher stationäre Zustände untersucht. Bild 13 zeigt die maximal gefahrenen Versuchstemperaturen, sie entsprechen noch denen eines metallischen Triebwerks. Dabei hat das Flammrohr Temperaturunterschiede in der Wand bis zu 300 K ohne Schaden überstanden. Ebenso scheint die gewählte Aufhängung in der metallischen Umgebung auch bei hohen Temperaturen ausreichend weich zu sein und keine großen Wärmesenken zu verursachen. Als weitere Versuche sind jetzt spontane Temperaturänderungen und zyklische Dauerstandtests geplant.

7.3. Vollkeramisches Laufrad

Beim Laufrad treten in der Nabe hohe Spannungen auf, so daß dort heißgepreßtes Material gewählt werden muß. Im Schaufelkranz sind die Spannungen niedriger. Die komplizierte Form des Kranzes läßt sich jedoch nur dann heißgepreßt herstellen, wenn entweder ein sehr hoher Anteil an Flußmitteln verwendet wird oder die Schaufeln aus dem vollen Material nachträglich herausgearbeitet werden. Im ersten Fall gehen,

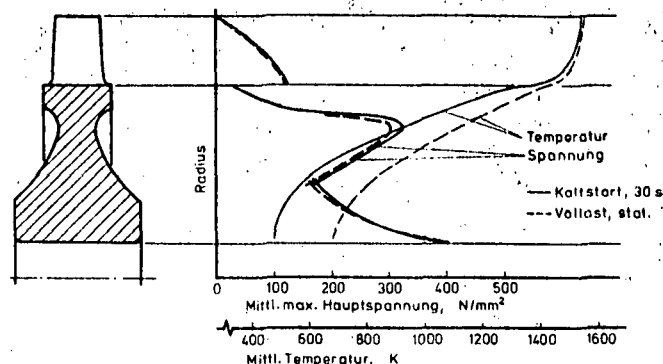
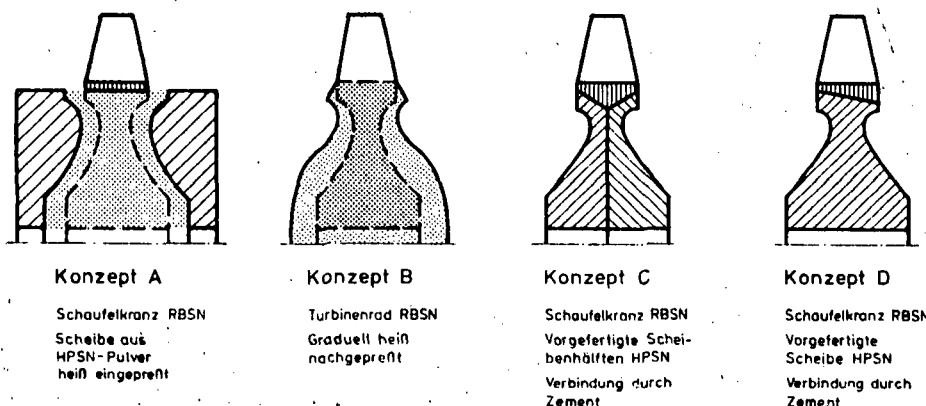


Bild 15. Mittlere max. Hauptspannung für ein vollkeramisches Laufrad
— 30 s nach Kaltstart, - - - stationäre Vollast

zumindest solange MgO als Flußmittel eingesetzt wird, die guten Hochtemperatureigenschaften verloren, im zweiten Fall wird die Fertigung zu langwierig und wirtschaftlich kaum vertretbar. Ein vollkeramisches Laufrad scheint deshalb heute nur als Verbindung einer heißgepreßten Nabe mit einem reaktionsgesinterten Schaufelkranz herstellbar. Bild 14 zeigt verschiedene Fertigungskonzepte eines solchen Laufrades. Beim Konzept A kann die beste Qualität der Verbindung erwartet werden, andererseits ist es hier besonders schwierig, den Schaufelkranz während des Heißpressens der Nabe radial abzustützen. Bei Konzept B wird eine Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe vermieden, jedoch ist es fraglich, ob sich durch Nachpressen der bereits vorgeformten Nabe ausreichend hohe Festigkeiten erreichen lassen. Bei Konzept C und D wird von bereits vorgefertigten Bauteilen ausgegangen und die Verbindung wird bei relativ mäßigem Druck und niedriger Temperatur mit einem Zement angestrebt. Welche Vorzüge oder Nachteile letztlich für die Weiterverfolgung des einen oder anderen Konzeptes sprechen, wird sich erst im Verlaufe der Entwicklung dieser Konzepte herausstellen.

Für die Laufradnabe sind diejenigen Spannungen kritisch, die sich nach einem Kaltstart mit anschließender Beschleunigung auf Vollast ergeben. Bild 15 zeigt, daß sich etwa 30 Sekunden nach dem Start höhere Spannungen als bei stationärem Vollastbetrieb ergeben. Die in Bild 15 angegebenen Spannungen sind mittlere Spannungen. Örtlich ergeben sich noch Spannungsspitzen, besonders im Halsbereich der Scheibe. Bei der Auslegung wurde heißgepreßtes Siliziumnitrid mit einer mittleren 4-Punkt-Biegefestigkeit von $\sigma_{bb} = 800 \text{ N/mm}^2$ und einem Weibullparameter von $m = 10$ zugrundegelegt. Mit einer Optimierungsmethode wurde die Nabengeometrie durch Änderung der Halsbreite und der Seitenkontur so lange variiert, bis die Ausfallwahrscheinlichkeit ein Minimum erreichte. Für die meisten Laufradkonzepte wurde dieses Minimum bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 8 von 100 Naben erreicht. Es wird erwartet, daß sich im Verlauf der Entwicklung vor allem die Homogenität des Werkstoffes noch verbessern läßt und damit höhere Weibullparameter m erzielt werden. Bei einem Weibullparameter $m = 12$ würde die oben angegebene Ausfallwahrscheinlichkeit auf etwa 10 von 1000 verringert. Über die Berechnung der Naben wurde in [3] ausführlich berichtet. Im Schaufelkranz sind die Spannungen im Übergangsbereich Schaufel-Nabe sowie die Thermochockbeanspruchungen bei instationärem Betrieb kritisch. Die Spannungen in der Schaufel werden dabei von der Schaufelgeometrie beeinflusst.



RBSN = Reaktionsgesintertes Siliziumnitrid
HPSN = Heißgepreßtes Siliziumnitrid

Bild 14. Konzepte für die Darstellung eines vollkeramischen Laufrades

Zur Prüfung der Bauteile wurden im wesentlichen Kaltstöße- und Thermochockversuche durchgeführt. Beim ge-

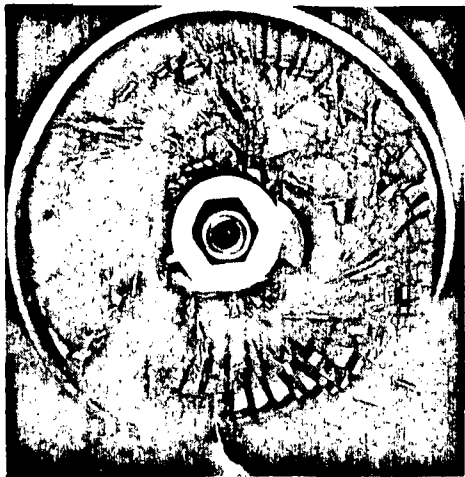


Bild 16 (links). Bruch einer Nabe bei einer Kranz-Umfangsgeschwindigkeit von 540 m/s



Bild 17 (rechts). Bruch einer Schaufel bei einer Kranz-Umfangsgeschwindigkeit von 420 m/s

genwärtigen Entwicklungsstand ist es kaum möglich, eine für statistische Zwecke genügend große Anzahl von Turbinenradnaben unter Betriebsbedingungen auf ihre berechnete Ausfallwahrscheinlichkeit zu überprüfen. Da jedoch der Zusammenhang zwischen Belastung und Ausfallwahrscheinlichkeit bekannt ist, kann in Kaltschleuderversuchen mit kleineren Losgrößen diese Prüfung durchgeführt werden. So werden die Naben bis zu Kranzumfahrgeschwindigkeiten von 520 m/s kaltgeschleudert. Die dabei auftretenden Spannungen ergeben eine Bruchwahrscheinlichkeit von 5 von 10. Erreicht jede zweite Nabe im Versuch diese Umfangsgeschwindigkeit, dann ist der Nachweis erbracht, daß dieses Los eine Kombination aus mittlerer Bruchfestigkeit und Weibullparameter m besitzt, die bei Betriebsbedingungen eine Ausfallwahrscheinlichkeit 8 von 100 ergeben würde. Dieser Nachweis wurde nach mehreren Entwicklungsschritten erreicht.

Bild 16 zeigt das Bruchbild einer Nabe bei einer Kranzumfahrgeschwindigkeit von 540 m/s. Weitere Schleuder- und Thermoschockversuche wurden mit planparallelen Scheiben durchgeführt, die aus einer heißgepreßten Nabe und einem reaktionsgesinterten Ring aufgebaut und mit einem Zement verbunden waren. Um eine schaufelähnliche Belastung zu simulieren, war der Ring dabei dicker als später benötigt und an verschiedenen Stellen des Umfangs geschlitzt. In den Schleuderversuchen wurden Umfangsgeschwindigkeiten von 400 m/s erreicht. Wo Brüche auftraten, verliefen sie durch den Kranz, so daß daraus gefolgert werden kann, daß eine Verbindung erreicht wurde, die zumindest die Kaltfestigkeit des reaktionsgesinterten Werkstoffes aufweist. Die Thermoschockversuche wurden an stehenden Bauteilen durchgeführt. Dabei wurden die Scheiben im Bereich des Kranzes abwechselnd mit Heißgas und Kaltluft beaufschlagt und an der Nabenbohrung gekühlt. Es wurden Zyklen unterschiedlicher Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit gefahren. Die Scheiben mit geschlitztem Kranz zeigten dabei keine Schädigung, jedoch traten bei Scheiben mit ungeteiltem Kranz Risse infolge thermischer Spannungen auf.

7.4. Laufrad aus einer metallischen Nabe und keramischen Einzelschaufeln

Gasttemperaturen bis 1550 K können auch von einem Laufrad beherrscht werden, das aus einer metallischen Nabe und keramischen Einzelschaufeln aufgebaut ist. Zunächst wurden experimentelle Untersuchungen mit vereinfachten Schaufeln aus heißgepreßtem Siliziumnitrid durchgeführt. In Bild 12 ist ein Rad mit Einzelschaufeln gezeigt. Ziel dieser Versuche war es, herauszufinden, welche Fußform und welche Zwischenschicht die beste Tragfähigkeit ergibt. In Kaltschleuderversuchen wurden bisher Kranzumfahrgeschwindigkeiten von 420 m/s erreicht.

Bild 17 wurde in dem Augenblick aufgenommen, in dem eine Schaufel bricht.

7.5. Weiterführende Arbeiten

Auf der Basis des erreichten Entwicklungsstandes kann festgestellt werden, daß Keramik mit großer Wahrscheinlichkeit für statische Bauteile wie Brennkammern einsetzbar ist. Beim vollkeramischen Laufrad kann die Nabe mit ausreichender Festigkeit hergestellt werden. Zumindest einige Verbindungsmethoden für Nabe und Kranz sind vielversprechend. In einem weiteren Entwicklungsschritt muß jetzt der Kranzring zu einem echten Schaufelkranz weiterentwickelt werden. Beim Konzept eines Laufrades aus metallischer Nabe und keramischen Einzelschaufeln müssen komplizierte Schaufelprofile herstellbar sein.

8. Anmerkung

Ein Teil der diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurde mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie (Kennzeichen NTS 5) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

An der Entwicklung der keramischen Bauteile waren zahlreiche Kollegen innerhalb der Volkswagenwerk AG beteiligt. Insbesondere möchten die Autoren Herrn Dr.-Ing. J. Tomas, Herrn Dipl.-Geophys. J. Siebels und Herrn Ing. (grad.) M. Langer für ihre Unterstützung danken.

Schrifttum

- [19] Werkstoffdaten NC 132, Norton Industrial Ceramics Division, Dez. 1973
- [20] Werkstoffdaten NC-350, Norton Industrial Ceramics Division, Dez. 1973
- [21] Ceramic Materials, Joseph Lucas Limited, 1972
- [22] Ceranox, Annawerk Keramische Betriebe GmbH
- [23] Silicon Nitride in Industry, Advanced Materials Engineering Ltd.
- [24] Ceramics for High-Temperature Engineering, Proceedings of the British Ceramic Society, No 22 June 1973, Stoke-on-Trent
- [25] Ceramics for High Performance Applications, Proceedings of the Second Army Materials Technology Conference, Hyannis, Mass., Nov. 1973
- [26] Werkstoffdaten NC-430, NC-435. Norton Industrial Ceramics Division, März 1975
- [27] Kennedy, P., Sherman, J. V.: Engineering applications of REVEL Silicon carbide. ATOM. Bulletin of the United Kingdom Atomic Energy Authority, Nr. 206, Dez. 1973
- [28] CERCOR, Glass Ceramic Rotary Heat Exchanger Cores. Corning Glas Works
- [29] Jack, K.: Production of High-Temperature, High Strength Nitrogen Ceramics. Ceramics for High-Performance Applications, Proceedings of the Second Army Materials Technology Conference, Hyannis Mass., Nov. 1973
- [30] Weibull, W.: A Statistical Theorie of the Strength of Materials. Ingeniörsvetenskapsakademiens Handligar Nr. 151 and Nr. 153, Stockholm 1939
- [31] Tomas, J.: Optimum Design of a Ceramic Turbine Wheel SAE-Paper 750 241

28 PROPELLANTS AND FUELS

amounts of boron and carbon is examined; variables are sintering temperature, weight loss, and density; one figure includes numeric data.

A77-17482 Smoke emission of aircraft seat materials. G. Cardinale and C. Cardinali (Avionieri S.p.A., Rome, Italy). *Journal of Fire and Flammability*, vol. 7, Oct. 1976, p. 530-538. 13 refs.

Measurements of the density of smoke emission from various nonmetallic materials present in a conventional aircraft passenger cabin are reported. The following materials were tested in a sealed smoke chamber: wool fabric, flexible and rigid polyurethane foam, integral-skin polyurethane foam, rigid PVC foam, and conventional plastic material used for panels, dishes, thermoformed shrouds, and other components. The results show that: (1) all the materials except flexible polyurethane foam will not comply with proposed FAA smoke density standards; (2) advanced materials which comply with a low-smoke-density standard, such as polycarbonate, should be substituted for wool upholstery fabric; and (3) the smoke density of integral-skin foams should be lowered by adding a smoke-density suppressant. F.G.M.

DATA SUMMARY: Measurement of specific optical smoke density 90 sec and 4 min after ignition and determination of corrected maximum smoke density from nonmetallic aircraft-seat materials exposed to heat under flaming and smoldering conditions; variables are specific optical smoke density corrected maximum smoke density, time to maximum smoke density, material density, material thickness; five tables include numeric data.

A77-17523 Mechanical behavior model for graphites. J. D. Buch (Prototype Development Associates, Inc., Santa Ana, Calif.). In: Properties related to fracture toughness; Proceedings of the Symposium, Montreal, Canada, June 22-27, 1975. (A77-17516 05-26) Philadelphia, Pa., American Society for Testing and Materials, 1976, p. 124-144. 32 refs. Navy-sponsored research.

A physically based statistical theory of fracture for polycrystalline bulk graphite is presented. It is based on the inherent weakness of graphitic grains normal to the a-b plane and a coincidence alignment of these planes which has been found to have a dominant influence on strength. These concepts lead to a self-consistent treatment of the tensile fracture of graphite on the basis of the physical parameters of grain size, grain orientation, grain cleavage stress, porosity, fracture toughness, and specimen volume. This interpretive analytical model for the fracture of graphite provides a method for predicting the mechanical and fracture behavior of graphite as a function of its microstructure. The concepts and logic are applicable to other material systems. (Author)

DATA SUMMARY: A number of stress-strain diagrams are presented showing the effects of such parameters as porosity, grain cleavage stress, the grain boundary-grain cleavage strength ratio and preferred orientation; variables are bulk strain, crack strain, expected largest crack agglomeration, initial elastic modulus, grain cleavage stress, fracture stress, volume fraction of porosity, grain size, and specimen volume; twelve figures include numeric data.

A77-17591 High-temperature ceramics for automobile gas turbines. II (Hochtemperaturkeramik für Automobilgasturbinen. II). P. Walzer, M. Köhler, and P. Rottenkolber. *Motortechnische Zeitschrift*, vol. 37, Dec. 1976, p. 525-529. 31 refs. In German. Research supported by the Bundesministerium für Forschung und Technologie.

The development of ceramic components for automobile gas turbine engines is described with attention given to the steady and unsteady thermal conditions the ceramics will experience, and their anti-corrosion and strain-resistant properties. The ceramics considered for use in the automobile turbines include hot-pressed Si₃N₄, reaction-sintered, isostatically pressed Si₃N₄, hot-pressed SiC, reaction-bonded SiC, and glass ceramics. Attention is given to the stress analysis of ceramic structures and the state of the art of ceramic structural technology is reviewed emphasizing the use of ceramics for combustion chambers and ceramic shrouded turbomachinery (a fully ceramic impeller). B.J.

DATA SUMMARY: Diverse data are presented; variables include maximum component temperature, maximum operational stress, service life, bending rupture strength, melting temperature, density, modulus of elasticity, expansion coefficient, thermal shock parameter, and thermal conductivity; two tables and four figures include numeric data.

Includes rocket propellants, igniters, and oxidizers; storage and handling; and aircraft fuels.

For related information see also 07 Aircraft Propulsion and Power, 20 Spacecraft Propulsion and Power, and 44 Energy Production and Conversion.

A77-16534 # Liquid hydrogen as propellant for commercial aircraft (Flüssiger Wasserstoff als Treibstoff für Verkehrsflugzeuge). A. Quast (Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Institut für Aerodynamik, Braunschweig, West Germany). *Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, Jahrestagung, 9th, Munich, West Germany, Sept. 14-16, 1976, Paper 76-188*. 29 p. 6 refs. In German.

An investigation is conducted concerning the feasibility to use liquid hydrogen as fuel for commercial aircraft. Effects related to lower fuel weight and larger tank volume compensate each other. The energy consumption in the case of an aircraft using hydrogen is, therefore, about the same as in the case of a corresponding conventional aircraft. However, a considerable amount of electrical energy is required to transform gaseous hydrogen into the liquid state. Liquid hydrogen is consequently significantly more expensive than synthetic hydrocarbons. As much as 40% of the operational costs of commercial aircraft can be related to fuel costs. It is concluded that a use of hydrogen in commercial aviation on the basis of the current status of technology is not economic. G.R.

A77-16747 Storable hypergolic solid fuel for hybrid rocket engines. R. V. Singh, R. Srinivasan, V. K. Srivastava (Defence Research and Development Laboratory, Hyderabad, India). *Defence Science Journal*, vol. 26, July 1976, p. 127-132.

The hybrid rocket propulsion concept advocates the use of solid fuels and liquid oxidizers instead of conventional all-solid or all-liquid combinations for both the fuel and oxidizer. Hypergolicity - known as the ability to ignite spontaneously on direct contact with oxidizer - is a desirable property of a fuel for almost every conceivable hybrid rocket engine application. The paper describes the development and ignition delay measurements of a solid fuel that is synthesized by condensing aniline with furfuraldehyde. The product is cast directly in the rocket motor casing. Particular attention is given to the casting and firing of the fuel in hybrid motors and to the ignition delay of the fuel with RFNA (Red Fuming Nitric Acid). It is found that the fuel has good hypergolicity, good storability at room temperature, and the required mechanical properties. S.D.

A77-17451 Compatibility of plastic and other materials with explosives, propellants, and pyrotechnics; Proceedings of the Symposium, Indian Head, Md., April 27-29, 1976. Symposium sponsored by the American Defense Preparedness Association, Washington, D.C., American Defense Preparedness Association, 1976. 220 p. \$15.

Papers are presented on the use of inverse gas chromatography to study the accelerated aging of composite explosives and propellants, short-term compatibility tests in double-base propellant manufacturing, and the compatibility aspects of plastics or application to impulse cartridge design. Also considered are trace contaminants in hydrazine, a laboratory procedure for determining the compatibility of positive expulsion elastomers with liquid propellants, and the use of a hot-wire probe to measure the thermal conductivity and diffusivity of liquid and solid propellants.

Individual items are announced in this issue.

B.J.

A77-17453 Interpretation of short-term compatibility test results in a double-base propellant manufacturing facility. P. M. Stevens (Hercules, Inc., Magna, Utah). In: Compatibility of plastic and other materials with explosives, propellants, and pyrotechnics; Proceedings of the Symposium, Indian Head, Md., April 27-29, 1976. (A77-17451 05-28) Washington, D.C., American Defense Preparedness Association, 1976, p. II-B-1 to II-B-5.

Inadvertent ignition or explosion of double-base propellants due to uncontrolled chemical decomposition from incompatibility must be prevented. The initial effort to identify incompatible materials must occur during propellant processing, curing, and subsequent short-term handling and storage. Most short-term compatibility decisions can be made based on the normal screening test data and

REPRODUCIBLE COPY
(FACILITY CASEFILE COPY)